

IMPLEMENTASI KENDALI PID PADA SISTEM PUTARAN MOTOR SEBAGAI KENDALI POSISI MESIN CNC *ENGRAVING*

Amri Alif Muhadi¹, Ibrahim Nawawi², Dwi Novianto³
Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang
amrialifmuhadi@gmail.com¹, ibrahim_nw@untidar.ac.id², nopi_jte@untidar.ac.id³

ABSTRAK

Abstrak – Mesin CNC (*Computer Numerical Controlled*) adalah mesin perkakas dengan sistem otomatisasi yang memiliki tingkat produktivitas dan ketelitian yang tinggi. Penggunaan mesin ini memberi keuntungan dalam hal produksi lebih cepat, hasil lebih banyak dan harga operasional lebih rendah. Saat proses pengeboran, terdapat tingkat kedalaman yang berbeda-beda, sehingga menimbulkan ketidakstabilan pada kecepatan motor yang berakibat pada keakuratan dan efisiensi alat. Oleh karena itu, diperlukan kendali yang dapat mengatur kecepatan putar Motor DC Spindel agar putaran Motor dapat stabil. Untuk memperoleh hal tersebut, maka digunakan metode untuk mengendalikan kecepatan Spindel dengan kendali *Proportional Integral Derivative* (PID). Kendali ini memanfaatkan sistem umpan balik dari *error output* atau selisih nilai yang terbaca dengan nilai yang telah ditentukan untuk mempertahankan kecepatan putar Motor. Proses penalaan parameter kendali PID menggunakan aturan Ziegler-Nichols. Hasil penalaan parameter PID selanjutnya diaplikasikan dan diujikan ke dalam sistem dengan $K_p = 7,2$; $K_i = 7,2$; dan $K_d = 0,018$. Dari nilai parameter tersebut sistem beroperasi pada kecepatan 8300 rpm dan mendapat respons *Rise Time* = 0,267 detik; *Settling Time* = 2,8 detik; *Overshoot* = 2,38%; *Error Steady State* = 126 rpm. Kendali PID yang telah diterapkan dapat mempertahankan kecepatan putar motor pada posisi setpointnya.

Kata kunci: Motor DC Spindel, Kendali PID, Kendali Sistem Putaran Motor DC Spindel, Ziegler-Nichols, CNC Engraving.

ABSTRACT

Abstract – CNC (*Computer Numerical Controlled*) machine is a machine tool with an automation system that has a high level of productivity and precision. The use of this machine provides advantages in terms of faster production, more output product and lower operational costs. During the drilling process, there are different levels of depth, which cause instability in the motor speed resulting in accuracy and machine efficiency issues. Therefore, a control system is needed to adjust the speed of Spindle DC Motor to ensure that motor's rotation is stable. To obtain this, the *Proportional Integral Derivative* (PID) control method is used to control the spindle speed. This control utilizes feedback from error output or the difference between the measured value and the set value to maintain motor's rotation speed. The PID control parameters are tuned using the Ziegler-Nichols rule. The resulting PID parameter values are then applied and tested in the system with $K_p = 7.2$, $K_i = 7.2$, and $K_d = 0.018$. From these parameter values, the system operates at a speed of 8300 rpm and gets a *Rise Time* = 0.267 seconds, *Settling Time* = 2.8 seconds, *Overshoot* = 2.38%, and *Steady State Error* = 126 rpm. PID control that has been implemented can maintain the rotational speed of its setpoint position.

Keywords: Spindle DC Motor, PID Control, Spindle DC Motor Speed Control, Ziegler-Nichols, CNC Engraving.

PENDAHULUAN

Mesin CNC (*Computer Numerical Controlled*) adalah mesin perkakas dengan sistem otomatisasi yang dijalankan melalui komputer internal dengan kode logika yang disimpan pada komputer tersebut. Untuk memenuhi kebutuhan pembuatan komponen, teknologi CNC saat ini merupakan metode terbaik untuk memenuhi produk pasar karena keakuratan dan efisiensinya. Keandalan peralatan CNC bergantung pada komponen pendukungnya, seperti *hardware* dan *software* [1].

Mikrokontroler berfungsi sebagai perangkat terprogram dalam proses pengoperasian mesin CNC ini, dengan motor stepper berfungsi sebagai aktuator linier pada setiap sumbu X, Y, dan Z.

Dengan menggunakan tegangan 5V, mikrokontroler dapat mengontrol gerak motor stepper dan mengontrol sistem kecepatan motor.

Terdapat motor Spindel pada sumbu Z ini, yang dapat digunakan untuk memotong atau mengebor benda. Pada kenyataannya, pengeboran membutuhkan kecepatan yang konstan untuk mendapatkan hasil yang sangat presisi, karena kedalaman pahat selalu berubah seiring dengan proses kerja [2].

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan membuat sistem kendali PID sebagai kendali posisi pada motor Spindel. Kendali posisi di sini berarti kecepatan putar motor Spindel yang dikendalikan oleh sistem kendali PID. Algoritma kendali PID termasuk algoritma Proporsional, Integral, dan Derivatif. Algoritma ini banyak digunakan dalam berbagai proses kendali.

Perancangan algoritma kendali PID untuk sistem kendali kecepatan putar motor sebagai kendali posisi, menggunakan rangkaian yang berbasis mikrokontroler untuk mengendalikan motor Spindel dalam mengubah posisi atau keadaan motor.

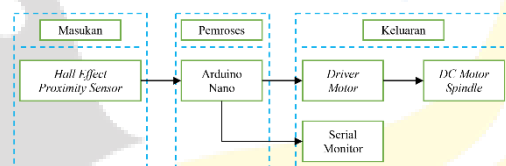
Dalam praktiknya, suatu sistem yang diharapkan, memiliki respons yang cepat namun juga memiliki kemampuan untuk mengurangi nilai *Steady State Error*. Namun, untuk mencapai tujuan ini, penggunaan kendali PID membutuhkan parameter yang berbeda. Untuk melakukan penalaan parameter dilakukan

dengan metode Ziegler-Nichols (ZN), dikarenakan dibanding dengan metode yang lain seperti Chien Hornes-Reswick (CHR) dan Cohen-Coon (CC), metode ZN dapat diterapkan pada sistem orde rendah maupun orde tinggi. Selain itu, metode ini unggul dalam mempersingkat waktu naik (*rise-time*), meskipun metode CHR memiliki keuntungan nilai yang lebih kecil [3].

METODE

A. Diagram Blok Sistem

Berdasarkan Gambar 1 cara kerja dari alat yang dibuat ialah masukan dari *Hall Effect Sensor* (sinyal *LOW* dan *HIGH*) yang diproses pada Arduino Nano untuk menghitung jumlah putaran ketika sinyal masukan *LOW*. Kemudian pada pemroses (Arduino Nano) menghitung kecepatan putaran motor (tercatat pada *Serial Monitor*) yang nantinya untuk menghitung nilai *error* putaran.

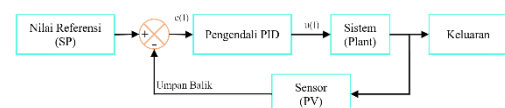


Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Pada kendali PID nilai *error* digunakan untuk menghitung nilai keluaran dengan hasil keluaran PWM dari pemroses (Arduino Nano), kemudian keluaran tersebut digunakan untuk masukan *Driver Motor* sebagai pengatur naik turunnya tegangan untuk *DC Motor Spindle* sehingga kecepatan putar motor berubah berdasar naik-turunnya nilai PWM.

B. Diagram Blok Sistem Kendali

Berdasarkan Gambar 2 cara kerja dari sistem kendali ialah dari nilai referensi (*Setpoint*) yang sudah diatur pada program digunakan sebagai patokan atau nilai yang dituju. Nilai *setpoint* ini digunakan untuk menghitung kendali PID pada sistem (*Plant*).

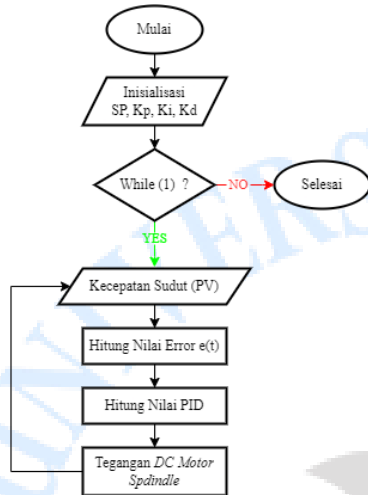


Gambar 2. Diagram Blok Sistem Kendali

Pengendali PID dihitung berdasar nilai *error* dari perbandingan antara *Setpoint* (SP) dan

Present Value (PV) dari umpan balik untuk mengendalikan nilai PWM sebagai keluaran. Kecepatan putar motor yang digunakan untuk menerima umpan balik dari sistem (*Plant*) diukur oleh sensor (*Present Value*).

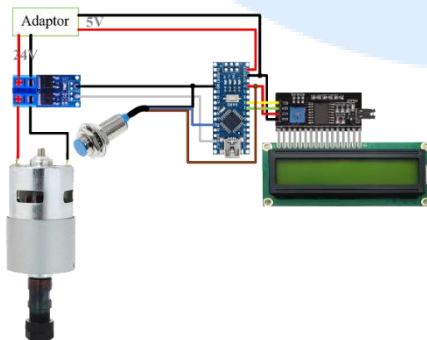
C. Diagram Alir Sistem



Gambar 3. Diagram Alir Sistem

Nilai parameter *Setpoint*, K_p , K_i , dan K_d telah diatur sebelum sistem dioperasikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Kemudian perulangan sistem dilakukan untuk melakukan kendali kecepatan sudut. Kecepatan sudut motor yang dideteksi dengan sensor, dihitung nilai *error*-nya dari perbandingan antara *Setpoint* dengan kecepatan sudut saat ini. Setelah nilai *error* diketahui sistem menjalankan program untuk menghitung kendali PID. Nilai PWM yang dihasilkan dari perhitungan PID ini akan digunakan untuk mengontrol *Driver Motor*, di mana keluaran *Driver Motor* menghasilkan tegangan yang digunakan untuk menyuplai motor Spindel.

D. Perancangan Perangkat Keras



Gambar 4. Rangkaian Sistem

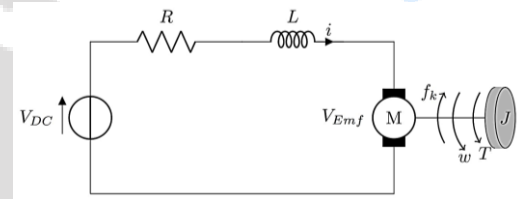
Berdasarkan Gambar 4 skema rangkaian dari sistem, terdapat beberapa komponen yang digunakan yaitu Mikrokontroler Arduino Nano berfungsi untuk pengolah data, *Hall Effect Sensor* untuk mendeteksi kecepatan, *Driver Motor* untuk mengendalikan Motor DC Spindel, *Display* sebagai penampil data kecepatan motor, dan Motor DC Spindel sebagai alat yang dikendalikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Analisis Sistem

Alat ini dirancang untuk melihat respons sistem, mengontrol kecepatan putar motor DC Spindel, dan mengumpulkan data untuk memodelkan motor DC menggunakan metode identifikasi sistem.

Representasi fungsi alih adalah metode yang digunakan untuk pemodelan dari motor DC. Gambar 5 menunjukkan sirkuit listrik dan besaran fisikal dari *armature* motor DC.



Gambar 5. Sirkuit Listrik dari DC Motor

Jika kita memodelkan motor DC secara elektrik dengan menerapkan analisis hukum Kirchoff mengenai tegangan, kita akan menemukan persamaan di dalam domain frekuensi, yakni :

$$V_{Sumber} = V_{Beban} \quad (1)$$

$$V_{DC} = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + K_e \cdot \omega \quad (2)$$

Dalam model mekanik motor DC, hukum Newton mengenai rotasi digunakan sebagai pendekatan.

$$\Sigma \tau = J \cdot \alpha \quad (3)$$

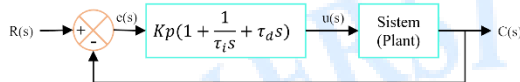
$$i = \frac{J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega}{K_t} \quad (4)$$

Transformasi Laplace dari persamaan (2) & (4) akan menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$V_s = R. I(s) + L. s. I(s) + K_e. \omega \quad (5)$$

$$I(s) = \frac{J. s. \omega(s) + B. \omega(s)}{K_t} \quad (6)$$

Hubungan antara masukan dan keluaran ditunjukkan dalam diagram blok berikut jika pengendali PID digunakan pada Plant.



Gambar 6. Diagram Blok PID pada Sistem

Gambar 6 menggambarkan diagram blok sistem motor DC. Untuk Plant diberi fungsi alih dari model sistem. Dari persamaan (5) disubstitusikan ke dalam persamaan (6), sehingga diperoleh fungsi alih $G(s)$ dari masukan tegangan $V(s)$ terhadap keluaran kecepatan putar $\omega(s)$ sebagai berikut.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{L. J. s^2 + (L. B + R. J) s + K_t K_e} \quad (7)$$

Untuk menyimulasikannya, parameter dan nilainya digunakan dalam penelitian ini untuk kendali kecepatan motor DC telah diberikan pada Tabel 1.

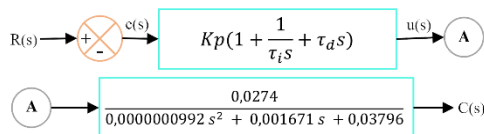
Tabel 1 Parameter Motor DC Spindel

Parameter	Nilai
R	4,175 Ω
Ls	0,000248 H
Js	0,0004 kg.m ²
B	0,0022 N.m.s/rad
Kt	0,0274 N.m/A
Ke	0,05 V.s

Dengan melepas umpan balik sistem maka fungsi alih $G(s)$ diubah menjadi $T(s)$, yaitu :

$$T(s) = \frac{0,0274}{0,0000000992 s^2 + 0,001671 s + 0,03796} \quad (8)$$

Kemudian fungsi alih dimasukkan pada sistem sehingga diperoleh :



Gambar 7. Diagram Blok PID pada Sistem Open-Loop

Dari sistem yang ada pada Gambar 7 disimulasikan dengan MATLAB, didapat tanggapan sistem dan parameter K_p , T_i , dan T_d menganut aturan Ziegler-Nichols.

Tabel 2. Penalaan Ziegler-Nichols

Tipe Kendali	K_p	T_i	T_d
PID	1,2 T/L	2L	0,5L

Maka didapat nilai parameter pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter K_p , T_i , dan T_d

Parameter	K_p	T_i	T_d
Nilai	7,2	0,01	0,0025

Merujuk dari Tabel 3, dapat ditetapkan untuk parameter kendali PID, seperti yang tertera pada Tabel 4.

$$K_i = K_p / T_i \quad (9)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (10)$$

Tabel 4. Parameter PID

Parameter	Nilai
K_p	7,2
K_i	720
K_d	0,018

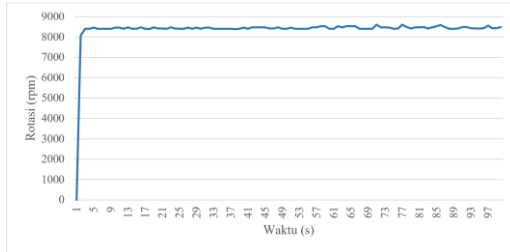
B. Hasil Pengujian Alat

Uji coba dilaksanakan untuk memastikan apakah alat tersebut dapat beroperasi sesuai dengan rencana dan perkiraan yang telah ditentukan. Dalam pengujian melihat kinerja dari kendali PID dan sensor yang terdapat pada sistem.



Gambar 8. Tampilan Alat

Pengujian dilakukan menggunakan 2 metode, yakni tanpa beban dan diberi beban saat mesin beroperasi. Diawali dengan menguji alat tanpa menggunakan kendali dan juga beban. Pengujian tersebut memberikan data dengan hasil sebagai berikut.



Gambar 9. Grafik Respons Dan Kecepatan *Spindle DC Motor* Tanpa Kendali & Beban

Analisis respons tanpa kendali dan beban :

1. *Rise Time* (T_r) :

$$T_r = \frac{60 \times 3}{100} = 1,3 \text{ detik}$$

Rise Time pada pengujian sistem tanpa kendali terjadi pada waktu 1,3 detik pada titik ke-3 di kecepatan 8413,21 rpm.

2. *Settling Time* (T_s) :

$$T_s = \frac{60 \times 6}{100} = 3,6 \text{ detik}$$

Settling Time pada pengujian sistem tanpa kendali terjadi pada waktu 3,6 detik pada titik ke-6.

3. *Maximum Overshoot* (M_p) :

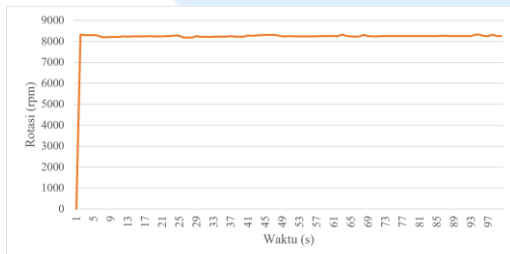
$$M_p = \frac{8611,89 - 8400}{8400} \times 100\% = 2,5\%$$

Maximum Overshoot pada pengujian sistem tanpa kendali adalah 2,5% dengan kecepatan Maximum Overshoot 8611,89 rpm

4. *Error Steady State* (E_{ss}) :

$$E_{ss} = 8400 - 8397,26 = 2,74 \text{ rpm}$$

Pada pengujian sistem tanpa kendali terdapat Error Steady State 2,74 rpm dengan kecepatan 8397,26 rpm sampai 8400 rpm.



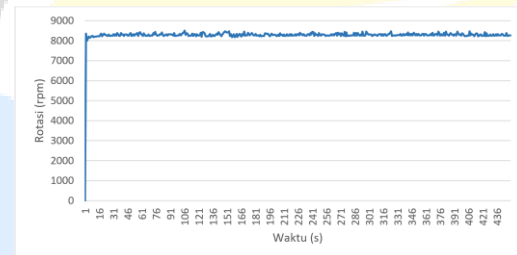
Gambar 10. Grafik Respons Dan Kecepatan *Spindle DC Motor* Tanpa Kendali Dengan Diberi Beban

Pengujian dengan diberi beban berupa kayu yang akan di ukir ketika sistem beroperasi, untuk melihat kecepatan putar *DC Motor Spindle* tanpa kendali ketika diberi beban, dan hasilnya kecepatan motor dengan diberi beban menurun ke kecepatan rata-rata 8171,25 rpm dari rata-rata kecepatan 8362,68 rpm atau menurun sebesar 2,289 % dari rerata kecepatan tanpa beban dengan lamanya waktu kecepatan menurun sebesar 5 detik, dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Kecepatan *Spindle DC Motor* Tanpa Beban Dengan Diberi Beban

Dari pengujian dengan menggunakan kendali PID untuk melihat respons dan kecepatan pada *Spindle DC Motor* yang dihasilkan dari kendali PID menggunakan acuan parameter di Tabel 4 dengan nilai $K_p = 7,2$; $K_i = 720$; $K_d = 0,018$ dan setpoint kecepatan putar motor 8300 rpm. Informasi mengenai hasil pengujian sebagai berikut.



Gambar 12. Grafik Respons Dan Kecepatan *Spindle DC Motor* Menggunakan Kendali PID Tanpa Beban

Analisis respons kendali PID tanpa beban :

1. *Rise Time* (T_r) :

$$T_r = \frac{60 \times 2}{450} = 0,267 \text{ detik}$$

Pada pengujian sistem dengan kendali PID tanpa beban didapat hasil *Rise Time* dengan nilai 0,267 detik pada titik ke-2 di kecepatan 8352 rpm.

2. *Settling Time* (T_s) :

$$T_s = \frac{60 \times 21}{450} = 2,8 \text{ detik}$$

Pada pengujian sistem dengan kendali PID tanpa beban didapat hasil *Settling Time* dengan nilai 2,8 detik pada titik ke-21 di kecepatan 8355 rpm.

3. *Maximum Overshoot* (M_p) :

$$M_p = \frac{8498 - 8300}{8300} \times 100\% = 2,38\%$$

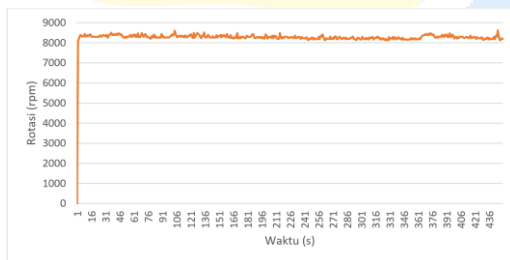
Maximum Overshoot pada pengujian sistem dengan kendali PID tanpa beban adalah 2,38% dengan kecepatan 8498 rpm.

4. *Error Steady State* (Ess) :

$$Ess = 8300 - 8174 = 126 \text{ rpm}$$

Pada pengujian sistem dengan kendali PID tanpa beban didapat hasil *Error Steady State* nya adalah 126 rpm dengan kecepatan 8174 rpm sampai 8300 rpm.

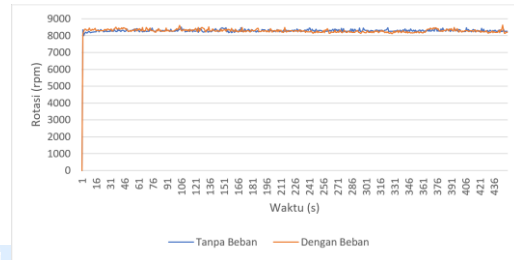
Pada pengujian selanjutnya sistem diberi beban berupa kayu pada saat sistem beroperasi untuk melakukan pemahatan/pengukiran. Ketika sistem beroperasi maka akan menyebabkan penurunan pada kecepatan putar *Spindle DC Motor* yang kemudian sistem kendali PID akan meningkatkan PWM untuk menambahkan tegangan keluaran pada Motor sehingga dapat mengembalikan kecepatan ke *setpoint* yang telah ditentukan.



Gambar 13. Grafik Respons Dan Kecepatan *Spindle DC Motor* Menggunakan Kendali PID Dengan Diberi Beban

Pada pengujian menggunakan beban berupa kayu, ketika sistem beroperasi terjadi penurunan kecepatan putar motor hingga 8259 rpm, dan kemudian sistem kendali PID meningkatkan PWM untuk menambah tegangan *supply* pada motor sehingga kecepatan putar motor kembali ke *setpoint* yang telah ditentukan. Waktu

kecepatan menurun dan kemudian naik kembali sampai *setpoint* dengan menggunakan kendali PID didapat waktu 0,266 detik.



Gambar 14. Grafik Perbandingan Kecepatan *Spindle DC Motor* Dengan Kendali PID Tanpa Beban Dan Diberi Beban

Pada pengujian didapat hasil perbandingan kecepatan yang ditampilkan Gambar 14, didapat rata-rata kecepatan putar motor yaitu 8266,34 rpm dengan selisih 33,66 rpm dari 8300 rpm (*setpoint*) atau dengan *error* 0,4% dari *setpoint* dengan selisih rata-rata kecepatan putar motor antara 'tanpa beban' = 8276,26 rpm dan 'diberi beban' = 8266,34 rpm adalah 9,92rpm.

KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Menurut hasil penelitian tentang sistem yang mengontrol kecepatan putar *DC Motor Spindle* dengan kendali PID, dapat disimpulkan kontrol kecepatan dengan kendali PID menggunakan metode *tunning* Ziegler-Nichols dengan parameter $K_p = 7,2$; $K_i = 7,2$ dan $K_d = 0,018$ menghasilkan respons *Rise Time* 0,267 detik, *Settling Time* 2,8 detik dan terdapat *Overshoots* 2,38% dan *Steady State Error* sebesar 126 rpm. Ketika kendali PID pada sistem diuji dengan diberi beban, kecepatan putar *DC Motor Spindle* menurun dan kembali lagi pada posisi *setpoint*-nya dengan rentang waktu 0,266 detik. Dengan dijadikannya kendali PID ini untuk mengontrol kecepatan putar pada *DC Motor Spindle* sehingga putaran motor dapat menjadi stabil.

B. Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan ini penulis memiliki saran yaitu :

1. Dalam menentukan nilai parameter seperti K_p , K_i dan K_d sangat mempengaruhi pada kestabilan sistem, maka harus diperhatikan ketika melakukan *tunning* PID dengan menggunakan metode apa yang akan diambil.

2. Pada sensor yang akan digunakan untuk mendeteksi kecepatan putar motor akan mempengaruhi pada hasil keluarannya, maka dari itu diperlukan komponen yang dapat bekerja pada rpm tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. K. Tunggal *et al.*, “Desain Dan Implementasi Sistem Kontrol Putaran Motor Pada Mesin CNC Laser Dengan Kontrol PID,” vol. 4, no. 1, pp. 77–86, 2021.
- [2] R. A. Dinata, “Pengaturan Kecepatan Motor DC Spindle dengan Kontroler PI Dan Perancangan Mekanik Mesin CNC Portable,” pp. 1–117, 2017.
- [3] R. Sulistiyadi, Sugiarto, and O. Yuliani, “Metode Penalaan Kontroler PID,” *Jmte*, vol. 01, no. 01, pp. 67–79, 2020.
- [4] F. Addinul Haq, “Mengatur Kecepatan Motor DC Spindle Berbasis PWM (Pulse Width Modulation) pada Mesin CNC Portable,” pp. i–77, 2017.
- [5] F. Firdaus, E. Priatna, N. Hiron, and N. Busaeri, “PROTOTYPE SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC DENGAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) CONTROLLER,” *J. ENERGY Electr. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 32–40, 2022.
- [6] A. Ma’arif, R. Istiarno, and Sunardi, “Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) pada Kecepatan Sudut Motor DC dengan Pemodelan Identifikasi Sistem dan Tuning,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 2, pp. 374–388, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i2.374.
- [7] M. I. Nugraha, A. Febriansyah, A. F. Khoiri, and D. Pratama, “Penerapan Advanced Pid Tuning Pada Plant Yang Critically Stable: Height Levitation Pingpong Ball,” *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 9, no. 01, pp. 41–46, 2019, doi: 10.33504/manutech.v9i01.31.
- [8] I. Prakoso, “ANALISA PENGARUH KECEPATAN FEEDING TERHADAP KEKASARAN PERMUKAAN DRAW BAR MESIN MILLING ACIERA DENGAN PROSES CNC TURNING,” *J. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 3, p. 1, 2017, doi: 10.22441/jtm.v3i3.1022.
- [9] R. Sk, Julsam, Kartika, A. Fendri, and Mulyadi, “Implementasi Mini CNC Router 3 Axis Untuk Pembuatan Huruf dan Gambar Berbasis GRBL 3.6.1,” *Proceeding Semin. Nas. Politek. Negeri Lhokseumawe*, vol. 3, no. 1, pp. A95–A102, 2019.
- [10] M. Sulaiman, “Modul Human Machine Interface (HMI) Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Metode Kontrol Bervariasi Berbasis LabView TUGAS AKHIR,” *J. Ekon. Vol. 18, Nomor 1 Maret201*, vol. 2, no. 1, pp. 41–49, 2016, [Online]. Available: <http://eprints.umm.ac.id/39639/>.
- [11] I. Syukran Harrizal, A. Prayitno, J. Teknik Mesin, U. Riau, and K. Bina Widya Panam, “Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin Cnc Milling 3 Axis Menggunakan Close Loop System,” *Jom Fteknik*, vol. 4, no. 2, pp. 1–3, 2017.